

# Stato dell'arte della gassificazione di biomasse legnose in Alto Adige e analisi tecnico-economica sui possibili miglioramenti verso un assetto poligenerativo

**Daniele Basso – Libera Università di Bolzano**

**Eleonora Cordioli – Libera Università di Bolzano**

**Elisa Bonadio – NOI Techpark Alto Adige**

**Francesco Patuzzi – Libera Università di Bolzano**

**Stefano Dal Savio – NOI Techpark Alto Adige**

**Tanja Mimmo – Libera Università di Bolzano**

**Marco Baratieri – Libera Università di Bolzano**

## Abstract

La diffusione di impianti di gassificazione di piccola scala ha avuto un importante incremento in Alto Adige nell'ultima decade, sia a causa dell'elevata quantità di biomassa legnosa disponibile in questa regione, sia per le condizioni economiche favorevoli generate dagli incentivi nazionali sulle energie rinnovabili. Attualmente gli impianti di gassificazione oltre a produrre energia elettrica e termica, generano uno scarto solido ad alto contenuto di carbonio chiamato char. L'analogia di questo materiale con il biochar prodotto da pirolisi ha sollevato l'interesse della comunità scientifica e degli stakeholder in merito alla possibilità di poterlo utilizzare come ammendante per i terreni. In questo modo un impianto di gassificazione potrebbe essere operato in modalità poligenerativa, cioè per la produzione di almeno tre prodotti: energia termica, energia elettrica e biochar. Al fine di valutare questa possibilità, il presente lavoro si è posto come obiettivo quello di analizzare lo stato dell'arte della diffusione in Alto Adige della tecnologia di gassificazione a piccola scala, caratterizzando qualitativamente e quantitativamente i flussi di char prodotti dagli impianti, confrontando i parametri chimico-fisici dei char con i limiti normativi imposti sugli ammendanti e, infine, valutando preliminarmente la fattibilità tecnico-economica di adeguare gli esistenti impianti per renderli poligenerativi.

## 1. Introduzione

Le biomasse, ed in particolare le biomasse legnose (legna in ciocchi, cippato, pellet), possono essere trasformate in energia termica ed elettrica oppure in biocombustibili attraverso specifiche tecnologie che implementano processi termochimici. La gassificazione è un processo termo-chimico condotto a temperature superiori ai 700 °C e in presenza di un agente ossidante (tipicamente aria) in percentuale inferiore a quella necessaria per la completa combustione. Questo processo consente di convertire la biomassa solida in una miscela gassosa, altrimenti conosciuta come syngas o producer gas, ricca di monossido di carbonio e idrogeno. Il syngas può essere direttamente utilizzato come combustibile in motori a combustione interna per produrre metanolo o idrogeno, oppure può essere convertito in altri combustibili sintetici liquidi attraverso il processo di Fischer-Tropsch. Il residuo solido del processo di gassificazione, ossia ciò che rimane della degradazione termica della biomassa, è un materiale carbonioso, comunemente noto come char o biochar. Il termine *biochar* viene generalmente utilizzato per indicare il residuo solido ottenuto dalla pirolisi di biomasse legnose, processo che avviene a temperature comprese tra 350 °C e 1 000 °C con quantità minime di ossigeno (European Biochar Foundation (EBC), 2020). Il biochar da pirolisi è un materiale con alto contenuto di carbonio, molto poroso e ricco di minerali e composti aromatici, che può essere utilizzato come ammendante per i terreni o come decontaminante per la purificazione di acque o suoli. A questo proposito, la gassificazione rientra nello spettro di tecnologie assimilabili alla pirolisi. In particolare, il char da gassificazione mostra molte similitudini con i carboni attivi e potrebbe quindi, ipoteticamente, sostituirli in diversi campi di applicazione (Benedetti, Patuzzi, & Baratieri, 2018). Grazie al suo alto contenuto di carbonio e alla porosità ben sviluppata, il char potrebbe essere utilizzato non solo per la combustione (Galhetas et al., 2012; Piazza, Zhang, Patuzzi e Baratieri, 2020), ma anche per l'adsorbimento di gas e coloranti (Benedetti, Cordioli, Patuzzi, & Baratieri, 2019; Marchelli et al., 2019; Runtti et al., 2014), come supporto per la preparazione di catalizzatori (Benedetti, Ail, Patuzzi, & Baratieri, 2019; Benedetti et al., 2020) o per applicazioni di tar cracking (Cordioli, Patuzzi, & Baratieri, 2019; Klinghoffer, Castaldi, & Nzihou, 2012). In letteratura vengono anche

citare applicazioni per la fertilizzazione del suolo (Hansen et al., 2015). Tuttavia, affinché il char prodotto da gassificazione possa essere classificato come *biochar*, il processo deve essere ottimizzato per la produzione del char, il quale deve presentare determinate caratteristiche qualitative. Per esempio, oltre ad avere un alto contenuto di carbonio ed una porosità ben sviluppata, il char deve avere un ridotto contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA), policlorobifenili (PCB), diossine (PCDD) e furani (PCDF). In questo capitolo verrà utilizzato indifferentemente il termine char o biochar per indicare il residuo solido della gassificazione, proprio perché il lavoro qui presentato, condotto nell'ambito del progetto Wood-Up, ha come obiettivo principale quello di verificare la possibilità di riutilizzo in agricoltura del char prodotto da impianti di gassificazione locali e di individuarne le modalità di impiego. L'utilizzo di questo residuo solido, e quindi la sua valorizzazione, potrebbe rendere la tecnologia della gassificazione più economicamente sostenibile anche in mancanza di un sistema di incentivazione a supporto.

Sono oltre 40 gli impianti di gassificazione di biomassa legnosa attualmente in funzione in Alto Adige (Patuzzi et al., 2016) e questi producono annualmente oltre 1 300 tonnellate di char, che vengono smaltite come rifiuto speciale non pericoloso ad un costo di circa 150 - 160 €/ton. Un riutilizzo in ambito agricolo potrebbe, da un lato, produrre effetti benefici nel terreno qualora fosse confermato il suo potenziale come ammendante, dall'altro ridurre notevolmente l'incidenza degli attuali costi di smaltimento sui costi operativi complessivi di un gassificatore, rendendo così questa tecnologia più sostenibile. In quest'ottica è stato condotto un censimento degli impianti di gassificazione di biomassa legnosa presenti in Alto Adige ed è stata svolta un'indagine sulle tipologie di reattori installati sul territorio provinciale e sulle caratteristiche tecniche di ciascun impianto. In particolare, è stata eseguita un'analisi dettagliata dei flussi di biomassa legnosa utilizzata e dei residui solidi (char) prodotti in tali impianti, con particolare attenzione alle relative procedure di smaltimento o destinazioni finali. Come accennato, il char prodotto in questi impianti può essere utilizzato come ammendante del suolo solamente se rientra nei limiti definiti dalle attuali leggi e prescrizioni in materia, in particolare il D.Lgs. 75/2010. Si è pertanto cercato di individuare, fra quelle analizzate, le

tecnologie di gassificazione più promettenti per la produzione di char utilizzabile a tal fine.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Mappatura impianti. Caratteristiche tecniche delle varie tecnologie

Nella Provincia Autonoma di Bolzano sono presenti ben 42 impianti di gassificazione di biomassa attualmente funzionanti, per una potenza totale installata di circa 6.7 MW elettrici (dato aggiornato a settembre 2018). Si stima una produzione annua di poco più di 52 GWh di elettricità e di circa 101 GWh di calore. La distribuzione sul territorio è abbastanza regolare ed uniforme, grazie anche al fatto che le tecnologie selezionate si adattano bene, sia per taglia che per caratteristiche di impianto, a particolari tipologie di utenza diffuse sul territorio altoatesino. Questa tipologia di impianti, infatti, è adottata in centrali di teleriscaldamento a biomassa, piccole industrie e segherie, e aziende agricole. Le centrali di teleriscaldamento a biomassa, avendo già a disposizione la logistica di approvvigionamento della biomassa, nonché la rete di teleriscaldamento che distribuisce il calore generato dall'impianto alle utenze, si prestano molto bene all'installazione di gassificatori, i quali possono sostituire o affiancare le grosse caldaie a cippato. In particolar modo durante il periodo estivo, quando le utenze necessitano dell'energia termica solo per il riscaldamento dell'acqua sanitaria, gli impianti di gassificazione possono fornire il poco calore necessario alla rete di teleriscaldamento, evitando di far funzionare le grosse caldaie a carico molto ridotto e, perciò, ad efficienze molto basse.

La crescita consistente che si è avuta nel numero di impianti di gassificazione in Alto Adige soprattutto fra il 2012 ed il 2014 è stata strettamente legata al sistema di incentivazione che con la legge 23/07/2009 prevedeva una tariffazione molto favorevole. Per esempio, per impianti sotto i 300 kW era prevista una tariffa di 280 € al MWh di elettricità generata. Tale crescita poteva essere potenzialmente maggiore, ma è stata rallentata da alcune problematiche di carattere tecnico o autorizzativo, legate al fatto che si trattava di una tecnologia

nuova e non ancora del tutto matura. Nel successivo periodo, compreso tra il 2014 e il 2018, l'incertezza legislativa e la riduzione della tariffa incentivante hanno comportato una diminuzione degli investimenti verso nuove installazioni. Tale situazione si è quindi evoluta in una paralisi quasi totale del mercato della gassificazione a partire dal 2019 e fino ad oggi: tale situazione è connessa alla mancanza di un sistema di incentivazione per nuovi impianti di gassificazione.

In Figura 1 è riportata la mappa con la distribuzione degli impianti di gassificazione operativi in Alto Adige, raggruppati per anno di installazione.

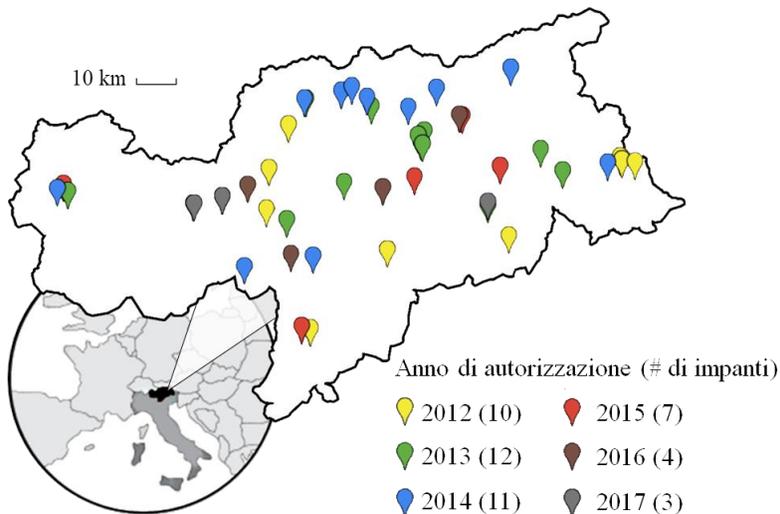


Fig. 1 – Diffusione degli impianti di gassificazione in Alto Adige nei diversi anni.

Per avere un quadro dettagliato delle tipologie di impianti installati in Alto Adige e raccogliere sia valori economici sia dati quantitativi di produzione e di consumo, è stato sottoposto un questionario ai gestori dei singoli impianti che si sono resi disponibili a collaborare al progetto, così da raccogliere il maggior numero di informazioni per quanto riguarda, in particolare:

- i flussi di biomassa legnosa utilizzata;
- i flussi di residui prodotti (char).

Sono state quindi raccolte informazioni sulla tipologia di biomassa utilizzata (cippato, pellet o bricchetti), sulla sua provenienza, sulle caratteristiche del materiale (es. umidità), sul consumo annuo dell'impianto e sul costo della materia prima utilizzata. Per quanto riguarda il char prodotto, sono state raccolte informazioni sulla tipologia del residuo (char secco, char umido, cenere, o liquidi di condensa), sulla sua destinazione, sulle quantità prodotte annualmente e sui costi di smaltimento (o prezzo di vendita).

Nel complesso sono stati raccolti i questionari di 17 impianti, rappresentativi di 10 delle 11 tecnologie presenti in Alto Adige, consentendo quindi di avere un quadro generale rappresentativo della situazione della filiera locale della gassificazione di biomasse legnose.

## 2.2 Monitoraggio degli impianti e chiusura dei bilanci di massa e di energia

A supporto e complemento dei questionari compilati dai gestori degli impianti, sono stati effettuati dei monitoraggi alcuni impianti di gassificazione, anche in questo caso a seconda della disponibilità dei gestori stessi. Per le attività di monitoraggio, è stata seguita la procedura contenuta nella Raccomandazione CTI 13 del Comitato Termotecnico Italiano, la quale traccia le linee guida per il monitoraggio di impianti che producono ed utilizzano gas di sintesi dalla gassificazione di biomasse legnose. I flussi di massa e di energia sono stati misurati tramite monitoraggio dell'impianto in esercizio, per una durata minima di cinque ore continuative, senza interruzioni o fasi di transizione dovute ad avvii o spegnimenti del reattore di gassificazione. Un parametro fondamentale che è stato considerato è il flusso di energia in ingresso, ossia la quantità di biomassa nell'unità di tempo, determinata pesando la biomassa stessa prima del suo ingresso nel reattore oppure – qualora non fosse possibile effettuare una misura diretta della massa – valutando la variazione del volume di stoccaggio della materia prima nel periodo di riferimento. La portata dell'agente gassificante (aria), così come quella del gas di sintesi in uscita, è stata calcolata a partire da misure di velocità dell'influente o dell'effluente effettuate con un tubo di Pitot e sulla base della composizione, nota per l'aria,

o rilevata per il gas di sintesi, rispettivamente. Infine, il flusso di char prodotto è stato determinato raccogliendo e pesando il residuo solido durante tutta la durata del monitoraggio. Sia la biomassa in ingresso che il char raccolto sono stati successivamente analizzati in laboratorio per determinarne il contenuto di umidità (UNI EN 14774) e di ceneri (UNI EN 14775:2010), il contenuto di carbonio, idrogeno, azoto, zolfo ed ossigeno (analisi elementare, UNI EN ISO 16948:2015), ed il potere calorifico (UNI EN 14918:2010). Anche la composizione del gas di sintesi prodotto dalla gassificazione è stata determinata durante il monitoraggio; in questo caso è stato utilizzato un gas cromatografo portatile, equipaggiato con colonne adatte alla misura delle concentrazioni di idrogeno, ossigeno, azoto, metano, monossido e diossido di carbonio del flusso gassoso analizzato.

Per quanto riguarda i flussi di energia, la potenza in ingresso  $P_{biom}$ , associata alla biomassa in input, è stata calcolata a partire dalla portata di biomassa  $\dot{m}_{biom}$  e dal suo potere calorifico inferiore  $LHV_{biom}$ :

$$P_{biom} = \dot{m}_{biom} \cdot LHV_{biom}$$

La potenza elettrica prodotta dall'impianto  $P_{el}$  è stata misurata durante il monitoraggio attraverso un analizzatore di potenza, o servendosi del misuratore già integrato nel sistema di controllo dell'impianto monitorato. La potenza termica prodotta, qualora non registrata dal sistema di controllo dell'impianto, è stata stimata misurando la portata del fluido termovettore con un misuratore di portata ad ultrasuoni e rilevando le temperature di mandata e di ritorno del circuito idraulico con termometri a resistenza di platino PT100. Sono quindi state calcolate l'efficienza elettrica  $\eta_{el}$ , l'efficienza termica  $\eta_{th}$  e l'efficienza totale  $\eta_{tot}$  dell'impianto:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el} - P_{aux}}{P_{biom}}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{biom}}$$

$$\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{th}$$

dove  $P_{aux}$  è la potenza elettrica consumata dagli apparecchi ausiliari.

## 2.3 Caratterizzazione del char

Oltre a quelle precedentemente indicate, il char raccolto dagli impianti di gassificazione è stato sottoposto ad ulteriori analisi di caratterizzazione per misurarne il contenuto di metalli, il contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA, metodo MI-03 rev. 13 2016) e il contenuto di diossine (metodo EPA 1613B 1994). L'obiettivo di queste analisi è quello di evidenziare possibili correlazioni tra le caratteristiche fisico-chimiche dei char raccolti e i principali parametri di processo, nonché con le specifiche caratteristiche degli impianti monitorati, quali ad esempio tipologia di reattore, potenza nominale, tipologia di biomassa utilizzata. Infatti, molti autori suggeriscono che le caratteristiche del char dipendano, innanzitutto, dal tipo di biomassa di partenza, ma anche, ed in modo significativo, dalla geometria e dalle condizioni operative (temperatura, pressione, flussi, agente gassificante) del reattore di gassificazione. Di conseguenza anche la tipologia del reattore può influire notevolmente sulle specificità del char prodotto.

## 2.4 Char prodotti in condizioni controllate

Al fine di valutare possibili correlazioni tra le caratteristiche chimico-fisiche dei char e le condizioni operative del processo di gassificazione, e quindi poter analizzare in dettaglio come la variazione di tali condizioni possa influire sulla qualità dei char, rendendoli, per esempio, conformi ai limiti normativi per i fertilizzanti, sono stati condotti dei test di gassificazione su biomassa legnosa utilizzando un prototipo di gassificatore installato presso i laboratori Bioenergy & Biofuels della Libera Università di Bolzano. Le prove sono state effettuate variando specifici parametri di processo, così da avere a disposizione un maggior numero di dati per il confronto, mantenendo fissa la quantità del combustibile in ingresso.

In particolare, sono stati prodotti dei char sia con differenti configurazioni di reattore, sia facendo variare le condizioni di processo. Sono stati prodotti in totale 6 differenti char, denominati R100, R75, R50, O-R, O-C e Q. I char R100, R75 e R50 sono stati prodotti a partire da cippato di legno e utilizzando un reattore downdraft open top. La temperatura media all'interno del reattore è stata di circa 750 °C. I char sono stati prodotti a differenti condizioni di carico

del reattore, ossia al 100% del carico nominale (R100), al 75% (R75) e al 50% (R50). I char O-R e O-C sono stati prodotti a partire da cippato di legno ed utilizzando un reattore downdraft di piccolissima taglia (20 kW). Il char O-R è stato estratto dal reattore, mentre il char O-C è stato prelevato dal ciclone a valle del reattore. Infine, il char Q è stato prodotto con un reattore prototipale downdraft open top di micro taglia (5 kW). La temperatura media di gassificazione è stata in questo ultimo caso superiore ai 600 °C. In Tabella 1 sono riportati i dettagli dei char prodotti in condizioni controllate.

Tabella 1 – Dettaglio sui char prodotti in condizioni controllate

Denominazione char	Condizioni di produzione
R100	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft, open top Carico: 100% del carico nominale
R75	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft, open top Carico: 75% del carico nominale
R50	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft, open top Carico: 50% del carico nominale
O-R	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft (20 kW) Char: prelevato all'interno del reattore
O-C	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft (20 kW) Char: prelevato all'interno del ciclone (sezione filtrante)
Q	Biomassa: cippato di legno Tipologia reattore: downdraft, open top (5 kW)

## 2.5 Valutazione comparativa rispetto alla normativa vigente e agli standard europei

Le caratteristiche dei char prodotti in condizioni controllate, di cui al precedente paragrafo, e quella dei char raccolti durante i monitoraggi degli impianti commerciali, sono state confrontate con i limiti della vigente normativa italiana in merito ai fertilizzanti e con i principali standard di riferimento europei, ossia IBI (International Biochar Initiative, <https://biochar-international.org/>), EBC (European Biochar Certificate, <http://www.european-biochar.org/en>) e BQM (Biochar Quality Mandate). Infine, sono stati considerati i biochar commerciali prodotti dall'UK Biochar Research Center e anche questi sono stati confrontati con i limiti normativi previsti dalla legislazione italiana attualmente vigente.

## 3. Risultati e discussione

### 3.1 Flussi di biomassa

Le 10 tecnologie di gassificazione considerate fra quelle attualmente operative in Alto Adige utilizzano biomassa legnosa sotto forma di cippato, pellet o bricchetti di diverse misure ed umidità. La pezzatura varia fra G30 (30 cm di lunghezza massima) e G150 (150 cm di lunghezza massima) ed il contenuto della frazione più fine non può superare il 20%, per evitare problemi di impaccamento all'interno dei reattori. Inoltre, per garantire un corretto funzionamento dell'impianto, per tutte le tecnologie l'umidità della biomassa all'ingresso dei reattori non può superare il 10%. Alcuni gestori acquistano biomassa già essiccata (cippato essiccato o pellet con umidità del 5 – 10%), che ha un prezzo più elevato (circa 132 – 136 €/ton per il cippato e 195 – 245 €/ton per i pellet); altri utilizzano, invece, un essiccatore esterno o sfruttano una tecnologia di reattore che prevede uno stadio iniziale di riscaldamento ed essiccamento della biomassa in ingresso (in questo caso il costo della biomassa si riduce a 65 – 96 €/ton).

Cippato e bricchetti provengono per la quasi totalità da attività manutentive di boschi o da residui di lavorazione di segherie dell'Alto Adige, in quest'ultimo caso il costo della materia prima è nullo. Il pellet proviene, invece, principalmente da Austria e Polonia, ma anche, in misura minore, dall'Alto Adige. Estendendo i dati raccolti tramite i questionari a tutti gli impianti oggi in funzione in Alto Adige, è stato calcolato che quasi 50'000 tonnellate di biomassa legnosa vengono consumate in impianti di gassificazione, per una spesa complessiva di quasi 5 milioni di euro all'anno per l'acquisto della materia prima.

### 3.2 Tipologie e flussi di residui

Le due principali tipologie di residui del processo di gassificazione sono il char e il liquido da condensa che viene raccolto durante la fase di pulizia e raffreddamento del gas di sintesi prodotto dal reattore. Entrambi questi scarti vengono smaltiti da aziende specializzate e in alcuni casi vengono classificati come rifiuti speciali non pericolosi.

Il char si presenta come una polvere nero-grigia molto fine e volatile, spesso di difficile gestione proprio per queste sue caratteristiche. Alcune delle tecnologie considerate in questo studio prevedono l'umidificazione del residuo tramite aggiunta di acqua nella sezione di scarico del char. Se tale processo consente da un lato una più agile gestione del residuo, dall'altro comporta un elevato costo di smaltimento, in quanto quest'ultimo viene generalmente calcolato in base al peso del materiale smaltito e l'aggiunta di acqua aumenta notevolmente il peso del residuo.

In generale, il trattamento del char prodotto costituisce una delle maggiori criticità nella gestione di un impianto di gassificazione, soprattutto perché il suo smaltimento comporta un costo non trascurabile nel bilancio economico dell'investimento. Il costo medio di smaltimento del char si aggira intorno ai 150 – 160 € a tonnellata, ma può variare considerevolmente a seconda della tipologia del rifiuto. A tal proposito si citano due casi particolari fra gli impianti di gassificazione analizzati. Alcuni impianti prevedono un "reformer" a valle del gassificatore in grado di ridurre il char in cenere, ossia una sorta di post-combustore. Tale dispositivo permette, da un lato, di ridurre notevolmente il volume e il peso del materiale di scarto e, dall'altro, di poterlo smaltire non più come rifiuto, bensì come semplice sottoprodotto di processo. Uno

degli impianti considerati, conferisce inoltre la cenere che esce dal reformer ad un cementificio limitrofo, arrivando ad annullare quasi del tutto il costo per il suo smaltimento. Il char prodotto da un'altra tipologia di reattore, invece, viene venduto in Austria come ammendante agricolo, trasformando così un costo in un ricavo, pari a circa 200 € a tonnellata.

La quantità totale di char prodotto dai gassificatori in Alto Adige ed il relativo costo complessivo di smaltimento sono stati stimati estendendo a tutti gli impianti in funzione i dati raccolti tramite i questionari. È stato calcolato che, annualmente, vengono prodotte oltre 1 200 tonnellate di char, a cui corrisponde un costo di smaltimento totale annuo di 180 000 - 192 000 €.

Relativamente al liquido da condensa, si tratta di un residuo marginale, prodotto dalla maggior parte delle tecnologie analizzate solo nelle fasi di avvio e di fermo macchina. Questo residuo contiene del tar, ossia una miscela di composti organici aromatici e poliaromatici con elevate temperature di ebollizione, che si formano durante la conversione termica della biomassa tramite gassificazione e che rendono il liquido da condensa inutilizzabile, lasciando come unica opzione possibile quella dello smaltimento come rifiuto.

### 3.3 Tecnologie

Tra le tecnologie adottate negli impianti di gassificazione installati in Alto Adige, la più diffusa è quella con configurazione *downdraft* a letto fisso, che consiste in un letto fisso costituito dal combustibile (la biomassa) attraverso il quale si fa passare, in equi-corrente verso il basso, il flusso dell'agente gassificante (tipicamente aria). Due tecnologie hanno invece adottato una configurazione a letto fluido doppio stadio, in cui gli stadi di pirolisi e di gassificazione della biomassa sono separati.

Infine, altre due tecnologie hanno optato per una configurazione *rising co-current*, molto simile a quella *downdraft* per la distribuzione delle varie zone del processo di gassificazione, ma la biomassa viene introdotta nella parte bassa del reattore ed il gas viene estratto dall'alto. Inoltre l'aria viene immessa nella zona di combustione in modo tale da formare un vortice che ricorda i reattori a letto fluido.

In Tabella 2 sono elencate le tipologie di reattore delle varie tecnologie selezionate per le analisi. Vengono indicate, oltre alla tipologia di biomassa utilizzata, anche la potenza elettrica e la potenza termica di ciascun modulo installato. Le tecnologie con due o più valori di potenza si riferiscono ad impianti con taglie diverse. Si precisa che l'ordine alfabetico con cui sono elencate le tecnologie in Tabella 2 non corrisponde all'ordine con cui verranno indicate in seguito le varie tecnologie (identificate tramite lettere maiuscole).

Tabella 2 – Tipologie di gassificatori installati in Alto Adige

Tecnologia	Tipologia reattore	Biomassa	Potenza elettrica	Potenza termica
			[kW/modulo]	
Burkhardt	rising co-current, stationary fluidized bed	pellet	180	270
Entrade Energiesysteme	downdraft, fixed bed	pellet	25	60
Holzenergie Wegscheid	downdraft, fixed bed	cippato	133	250
Kuntschar Energieerzeugung	downdraft, fixed bed	cippato	133	250
Spanner Re <sup>2</sup>	downdraft, fixed bed	cippato	9 30 45	22 80 120
Stadtwärke Rosenheim	double stage, fluidized bed	cippato	50	110
Syncraft Engineering	double stage, floating fixed bed	cippato	200	480
Urbas Maschinenfabrik	downdraft, fixed bed	cippato	150	300
Wubi	downdraft, fixed bed	cippato	100 199	200 300
Xylogas & EAF	downdraft, fixed bed	cippato	220	440

### 3.4 Bilanci di massa e di energia

La Figura 2 mostra i risultati aggregati dei bilanci di massa effettuati utilizzando i dati raccolti dal monitoraggio degli impianti, in forma di box plot. Tale rappresentazione permette di visualizzare la distribuzione dei dati relativi a tutte le tecnologie, evidenziando gli intervalli di valori in cui sono concentrati il maggior numero di dati (compresi tra il primo ed il terzo quartile), nonché i valori mediani, i valori massimi e i valori minimi di ciascun parametro considerato. Sono indicate, in particolare, le quantità specifiche di aria introdotta nel gassificatore e di producer gas generato, espresse per unità di massa della biomassa utilizzata, e la quantità di char prodotto, espressa come percentuale (in massa) della biomassa utilizzata. Si osserva che, per tutti gli impianti analizzati, la quantità di aria utilizzata è circa 1,5 - 2 volte quella della biomassa in ingresso, e che la quantità di gas prodotto è circa 2,4 - 3 volte quella della biomassa. La quantità di char prodotto mostra una maggior variabilità da un impianto all'altro, ma in media circa il 2% della biomassa viene raccolto all'uscita del reattore come residuo solido.

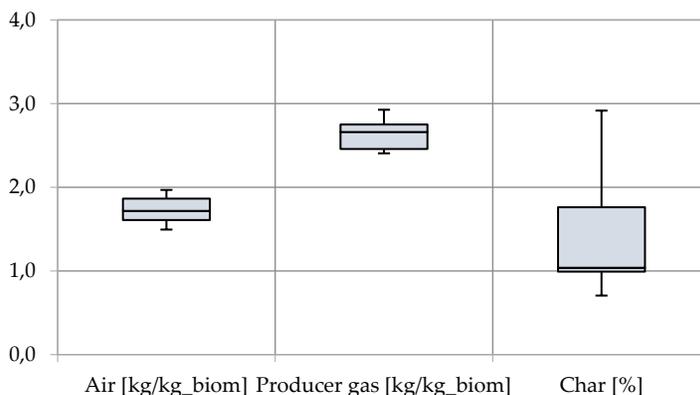


Fig. 2 – Risultati dei bilanci di massa effettuati sui dati raccolti dal monitoraggio degli impianti installati in Alto Adige: quantità di aria utilizzata, quantità di producer gas e char prodotti.

Per quanto riguarda i bilanci energetici, la Figura 3 raccoglie i risultati dei calcoli delle efficienze elettrica  $\eta_{el}$ , termica  $\eta_{th}$  e totale  $\eta_{tot}$  degli impianti monitorati. In generale, l'efficienza elettrica degli impianti è compresa tra il

17% e il 26%, l'efficienza termica tra il 36% e il 59%, l'efficienza totale tra il 68% e il 78%, con l'unica eccezione di un impianto che ha un'efficienza totale pari al 53%.

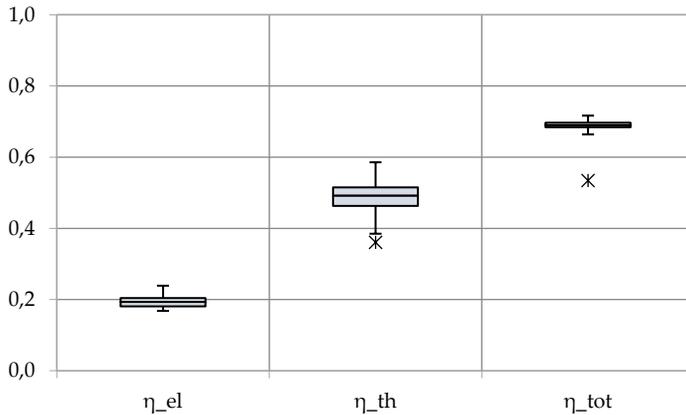


Fig. 3 – Risultati dei bilanci energetici effettuati sui dati raccolti dal monitoraggio degli impianti installati in Alto Adige: efficienza elettrica, efficienza termica ed efficienza totale.

### 3.5 Caratterizzazione char

Nelle seguenti tabelle, vengono riportati i risultati delle analisi chimico-fisiche condotte sui char raccolti durante i monitoraggi degli impianti commerciali.

Come si può notare in Tabella 3, il contenuto di carbonio nei char varia da un minimo di 48,03% (tecnologia C) ad un massimo di 91,51% (tecnologia F), con una media pari al 71,67%. Questa elevata variabilità dimostra come la tipologia del sistema di gassificazione, nonché le condizioni interne del reattore, influiscano sul rendimento complessivo del processo. In particolare, la tecnologia F implementa un reattore a doppio stadio, mentre la C un reattore downdraft. Risulta anche interessante notare come la tecnologia C produca un char con una superficie specifica molto inferiore rispetto alle altre (solo 78 m<sup>2</sup>/g).

Tabella 3 – Analisi prossimale, elementare, potere calorifico superiore (HHV) e potere calorifico inferiore (LHV) e superficie specifica dei char prodotti da impianti commerciali

Tecnologia	A	B	C	D	E	F	G	H
Ceneri [%]	27,84	16,08	49,52	31,50	13,34	6,49	29,17	25,64
C [%]	68,63	80,23	48,03	66,96	78,97	91,59	69,46	69,49
H [%]	0,33	0,49	0,89	0,18	0,68	0,52	0,11	0,20
N [%]	0,83	0,23	0,25	0,16	0,20	0,25	0,12	0,46
S [%]	n.d.	0,28	n.d.	0,63	0,31	0,56	0,27	0,33
O* [%]	2,37	2,69	1,31	0,57	6,50	0,60	0,87	3,88
HHV [MJ/kg]	23,11	26,74	14,52	19,69	25,53	30,92	22,87	24,17
LHV [MJ/kg]	23,04	26,64	14,33	19,65	25,38	30,81	22,84	24,12
Umidità [%]	n.d.	1,04	n.d.	81,73	2,58	1,59	0,23	2,02
Sup. specif. [m <sup>2</sup> /g]	352	128	78	281	587	272	320	306

In Tabella 4 vengono riportati i dati relativi al contenuto di minerali e metalli pesanti all'interno dei char prodotti dagli impianti commerciali analizzati. In questo caso si può notare una discreta presenza di cromo e zinco all'interno dei char. Questi metalli possono derivare dalle parti metalliche delle automazioni presenti all'interno dei gassificatori (e.g. coclee), così come dai processi meccanici di pretrattamento della biomassa, quali ad esempio la cippatura o la pellettizzazione. Nell'ottica di poter utilizzare il char come ammendante, diventa pertanto necessario individuare dei possibili miglioramenti degli impianti al fine di ridurre i quantitativi di questi metalli e rendere così i char conformi ai requisiti normativi, come discusso al paragrafo successivo.

Sono stati inoltre analizzati i contenuti di diossine all'interno dei char. Come si può facilmente evincere dai dati riportati in Tabella 5, il contenuto di questa classe di composti organici risulta molto ridotto, se non addirittura al di sotto dei limiti di rilevanza dello strumento (<0,1 ng/kg), per tutti i campioni di char analizzati.

Stato dell'arte della gassificazione di biomasse legnose in Alto Adige

Tabella 4 – Analisi dei minerali e dei metalli pesanti presenti nei char prodotti da impianti commerciali

Tecnologia	A	B	C	D	E	F	G	H
Li [mg/kg]	9,9	8,7	6,9	9,1	9,6	8,0	6,8	10,4
Na [mg/kg]	268,4	1724,9	235,7	495,1	341,8	238,0	450,1	576,8
Mg [mg/kg]	5522,6	4802,7	11467,5	4931,4	3680,8	1562,4	9330,9	4268,6
Al [mg/kg]	803,2	299,6	988,5	7081,8	488,4	141,9	680,3	165,9
K [mg/kg]	18570,4	14810,4	18974,8	14106,5	12273,9	6429,8	31825,2	15711,6
Ca [mg/kg]	4670,3	14528,7	3400,4	11431,8	14790,1	10792,5	4621,6	16714,4
Ti [mg/kg]	36,4	40,7	47,7	38,9	46,1	13,0	35,7	23,0
V [mg/kg]	1,0	0,6	1,3	0,9	3,2	0,3	1,0	0,5
Cr [mg/kg]	6,6	5,3	14,3	3,9	383,3	2,7	16,7	28,7
Mn [mg/kg]	3036,3	5154,0	7056,8	839,1	903,9	557,3	2905,9	3408,0
Fe [mg/kg]	615,9	511,9	2509,3	589,3	2162,1	138,2	759,7	351,0
Co [mg/kg]	0,9	3,0	3,1	0,5	4,3	1,3	8,1	1,8
Ni [mg/kg]	6,6	12,8	16,5	5,3	274,2	4,2	40,6	61,9
Cu [mg/kg]	34,4	54,9	73,3	26,5	24,8	8,0	46,9	34,6
Zn [mg/kg]	478,1	449,7	1316,9	182,6	263,1	84,0	397,4	346,6
As [mg/kg]	1,1	0,3	0,7	0,5	0,7	0,2	0,6	0,2
Se [mg/kg]	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
Rb [mg/kg]	41,8	71,1	43,3	35,1	21,3	15,3	73,9	43,1
Sr [mg/kg]	50,5	48,8	57,8	38,8	65,2	60,8	26,1	55,8
Mo [mg/kg]	0,9	1,5	2,1	0,7	7,3	0,4	2,6	1,5
Cd [mg/kg]	1,5	5,9	0,1	1,7	1,8	0,5	0,4	0,1
Sn [mg/kg]	1,1	1,1	0,7	0,8	1,2	0,8	0,8	0,9
Sb [mg/kg]	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3	0,1
Ba [mg/kg]	26,4	42,4	15,5	57,2	41,1	69,8	29,4	34,5
Tl [mg/kg]	0,3	0,8	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,0
Pb [mg/kg]	0,4	1,6	0,2	0,4	0,4	0,7	0,4	0,3

Tabella 5 – Analisi del contenuto di diossine nei char prodotti da impianti commerciali

Tecnologia		A	B	C	D	E	F	G	H
Diossine	2378 TCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	12378 PCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	123478 HxCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	123678 HxCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	123789 HxCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	1234678 HpCDD [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,3	<0,1	<0,1
	OCDD [ng/kg]	2,7	1,5	1,2	0,6	2,1	2,2	0,7	2,2
	2378 TCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
	12378 PCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	23478 PCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	123478 HxCDF [ng/kg]	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1
	123678 HxCDF [ng/kg]	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	234678 HxCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	123789 HxCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	1234678 HpCDF [ng/kg]	0,3	0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,2	<0,1	0,3
	1234789 HpCDF [ng/kg]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
OCDF [ng/kg]	<0,1	0,6	<0,1	0,4	2,4	0,6	<0,1	<0,1	

Anche il contenuto di policlorobifenili (PCB) risulta globalmente limitato per la maggior parte dei char analizzati, come evidenziato dai dati riportati in Tabella 6. Sia per quanto riguarda le diossine che i PCB è possibile quindi ipotizzare che la tipologia di processo e i profili di temperatura coinvolti nei gasificatori, assieme alla tipologia di biomassa utilizzata, concorrano a limitare la formazione di questi composti.

Infine, le concentrazioni di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono state riportate in Tabella 7. In questo caso, si può facilmente notare come la presenza di questi composti non sia trascurabile e sia addirittura decisamente rilevante per alcuni char. La presenza di questi composti all'interno dei char li rende non direttamente utilizzabili in agricoltura, in quanto tossici. Pertanto, dei miglioramenti tecnologici volti a limitare la formazione e l'accumulo degli IPA all'interno dei char risultano essere di fondamentale

importanza perché determinanti per la possibilità o meno di usare i char come ammendante. Nel paragrafo successivo verranno evidenziate le differenze tra il contenuto di IPA nei char analizzati e i limiti imposti dalla vigente normativa sui fertilizzanti (D.Lgs. 75/2010).

Tabella 6 – Analisi del contenuto di PCB nei char prodotti da impianti commerciali

Tecnologia		A	B	C	D	E	F	G	H
PCB	Iupac77 [ng/kg]	10	<1	4	9	7	6	5	8
	Iupac81 [ng/kg]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	Iupac123 [ng/kg]	7	<1	10	10	8	4	1	7
	Iupac118 [ng/kg]	347	391	252	410	292	282	518	248
	Iupac114 [ng/kg]	1	2	<1	4	<1	<1	<1	2
	Iupac105 [ng/kg]	59	6	39	95	45	59	53	52
	Iupac126 [ng/kg]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	Iupac167 [ng/kg]	50	54	49	59	43	49	65	49
	Iupac156 [ng/kg]	173	224	118	142	81	133	230	120
	Iupac157 [ng/kg]	15	11	12	15	10	13	17	13
	Iupac169 [ng/kg]	<1	<1	1	2	<1	<1	<1	<1
	Iupac189 [ng/kg]	19	1	13	18	14	15	11	18

### 3.6 Conformità dei char prodotti da impianti commerciali con la vigente legislazione in merito ai fertilizzanti

La vigente normativa italiana sui fertilizzanti si basa sul Regolamento (CE) 2003/2003 e sul D.Lgs. 75/2010 e s.m.i.. In particolar modo in questo ultimo decreto vengono imposti dei limiti sull'utilizzo di char in agricoltura. Innanzitutto, il suddetto decreto definisce come "biochar" un materiale prodotto per mezzo di un "processo di carbonizzazione di prodotti e residui di origine vegetale provenienti dall'agricoltura e dalla silvicoltura, oltre che da sanse di oliva, vinacce, crusconi, noccioli e gusci di frutta, cascami non trattati della lavorazione del legno, in quanto sottoprodotti delle attività connesse. Il processo di carbonizzazione è la perdita di idrogeno, ossigeno e azoto da parte della materia organica a seguito di applicazione di calore in assenza, o ridotta presenza, dell'agente ossidante, tipicamente l'os-

*sigeno. A tale decomposizione termochimica è dato il nome di pirolisi o di piroschissione. La gassificazione prevede un ulteriore processo ossidoriduttivo a carico del carbone prodotto da pirolisi". Il char così prodotto deve quindi soddisfare i limiti normativi riportati in Tabella 8.*

Tabella 7 – Analisi del contenuto di IPA nei char prodotti da impianti commerciali

Tecnologia		A	B	C	D	E	F	G	H	
Naftalene	[µg/kg]	2128649	1912973	2386	200368	859491	110338	26861	563819	
Acenaftilene	[µg/kg]	514300	171045	138	19495	62838	140	7	62703	
Acenaftene	[µg/kg]	314055	11197	26	1565	29918	515	270	4536	
Fluorene	[µg/kg]	16341	5287	13	27	86	203	1650	367	
Fenantrene	[µg/kg]	584386	385187	119	78749	190237	9806	1220	118217	
Antracene	[µg/kg]	412102	40452	18	6351	13454	457	1245	25644	
Fluorantene	[µg/kg]	477586	47703	36	4934	29200	1218	114	46343	
Pirene	[µg/kg]	434026	51745	22	4160	38312	817	60	44436	
BaA	[µg/kg]	104671	3742	4	226	547	20	21	12673	
CHR	[µg/kg]	135638	4514	5	236	892	220	26	25125	
B(b)F	[µg/kg]	32126	630	3	27	119	17	5	5197	
IPA	B(j)F	[µg/kg]	14180	251	2	7	29	12	2	3318
	B(k)F	[µg/kg]	10309	217	6	14	38	13	1	2170
	BeP	[µg/kg]	20993	722	3	25	107	73	41	8817
	BaP	[µg/kg]	14709	458	4	15	51	5	66	4349
	Per	[µg/kg]	3273	100	3	7	24	16	38	866
	BghiP	[µg/kg]	1632	58	1	1	17	0	1	1658
	IcdP	[µg/kg]	1921	49	1	2	2	2	1	967
	DBahA	[µg/kg]	1066	30	1	0	2	2	2	771
	DBalP	[µg/kg]	290	21	6	3	2	11	25	393
	DBaeP	[µg/kg]	492	12	8	2	2	4	28	211
	DBaiP	[µg/kg]	70	11	13	2	6	6	20	20
	DBahP	[µg/kg]	151	87	27	3	9	19	51	29

Tabella 8 – Modifiche dell'Allegato 2 del D.Lgs. 75/2010

Titolo minimo in elementi e/o sostanze utili. Criteri concernenti la valutazione. Altri requisiti richiesti	Elementi o sostanze utili il cui titolo deve essere dichiarato. Caratteristiche diverse da dichiarare. Altri requisiti richiesti	Limiti ai parametri chimico-biologici	Note
C tot di origine biologica <sup>(*)</sup> % s.s.	Granulometria (passante mm 0,5-2-5)	IPA ( $\Sigma$ 16 molecole) < 6	<sup>(*)</sup> sottratto il C da carbonati
≥ 20 e ≤ 30 (CI <sup>(*)</sup> 3)	Azoto tot	mg/kg s.s.	<sup>(*)</sup> Classe di qualità
> 30 e ≤ 60 (CI <sup>(*)</sup> 2)	Potassio tot	PCB < 0,5	<sup>(§)</sup> Per utilizzo quale ammendante di substrati per ortovivaismo ≤ 100
> 60 (CI <sup>(*)</sup> 1)	Fosforo tot	mg/kg s.s.	<sup>(§)</sup> Per utilizzo quale ammendante di substrati per ortovivaismo ≤ 100
Salinità mS/m ≤ 1000 <sup>(§)</sup>	Calcio tot	Diossine < 9 ng/kg	<sup>(§)</sup> Per utilizzo quale ammendante di substrati per ortovivaismo ≤ 100
pH <sub>(H2O)</sub> 4-12	Magnesio tot		<sup>(§)</sup> Per utilizzo quale ammendante di substrati per ortovivaismo ≤ 100
Umidità % ≥ 20 per prodotti polverulenti <sup>(*)</sup>	Sodio tot		<sup>(*)</sup> Indice di stabilità del carbonio
Ceneri % s.s.	% C da carbonato		<sup>(*)</sup> Dato comunque da dichiarare
> 40 e ≤ 60 (CI <sup>(*)</sup> 3)	Test fitotossicità e accrescimento (test lombrichi e o saggio germinazione/accrescimento)		
≥ 10 e ≤ 40 (CI <sup>(*)</sup> 2)	Max ritenzione idrica		
< 10 (CI <sup>(*)</sup> 1)			
H/C (molare) <sup>(*)</sup> ≤ 0,7			

Nella Tabella 9 vengono riportati i risultati delle analisi chimico-fisiche condotte sia sui char prodotti da impianti commerciali che su quelli prodotti in condizioni controllate. I dati riportati in tabella sono limitati ai parametri che sono significativi a livello normativo. In colore rosso vengono evidenziati i parametri che non soddisfano gli attuali limiti normativi. Si può in particolare notare come tutti i char (tranne uno) eccedano il limite imposto sulla concentrazione di IPA, in alcuni casi assumendo valori cinque volte più elevati.

Tabella 9 – Comparazione tra le caratteristiche chimico-fisiche dei char e i limiti normativi italiani (in rosso i parametri che non soddisfano i limiti)

C	H/C	Ceneri	Umidità	Cr(tot)	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Σ IPA	TEQ <sub>PCB</sub>	TEQ <sub>DX</sub>
	[mol/mol]	[%]	[%]	[mg/kg]	[ng/kg]	[mg/kg]						
Limiti	> 20 < 0,7	< 60	> 20	--	100	230	500	1,5	140	6	0,5	9
A	68,6 0,0	27,8		6,6	6,6	34,4	478,1	1,5	0,4	5179,9	<1	<0,1
B	80,2 0,1	16,1	1,0	127,8	248,7	84,6	246,8	2,4	0,9	132,0	<1	<0,1
C	48,0 0,2	49,5		14,3	16,5	73,3	1316,9	0,1	0,2	2,8	<1	<0,1
D	67,0 0,0	31,5	81,7	3,9	5,3	26,5	182,6	1,7	0,4	316,2	<1	<0,1
E	79,0 0,1	13,3	2,6	383,3	274,2	24,8	263,1	1,8	0,4	1225,2	<1	<0,1
F	91,6 0,0	6,5	1,6	2,7	4,2	8,0	84,0	0,5	0,7	123,8	<1	<0,1
G	69,5 0,0	29,2	0,2	16,7	40,6	46,9	397,4	0,4	0,4	31,7	<1	<0,1
H	69,5 0,0	25,6	2,0	28,7	61,9	34,6	346,6	0,1	0,3	916,2	<1	<0,1
I	55,2 0,1	29,5		5,3	8,0	51,4	586,2	6,1		60,2		<0,1
M	48,1 0,0	32,5		25,8	16,0	36,3	418,9	0,3		124,3		<0,1
R100	62,1 0,1	17,9	3,0	3,8	2,6	9,4	29,0	0,0		132,6		
R75	41,4 0,0	28,0	3,7	4,0	6,4	21,9	95,2	0,1		193,3		
R50	48,5 0,0	29,7	6,6	10,0	35,2	42,6	205,2	0,4		414,8		
O-R	71,1 0,0	11,2	1,4	6,2	4,0	11,7	14,8	0,1		34,2		
O-C	23,9 0,1	54,2	1,7	46,7	45,2	41,2	288,9	0,5		409,4		7,0
Q	84,9 0,2	3,9	3,0	1,7	2,4	8,0	48,5	0,0		27,0		

Le elevate concentrazioni di IPA possono essere dovute principalmente ai profili di temperatura che si generano all'interno del gassificatore, che contribuiscono alla formazione di questi composti, e a fenomeni di adsorbimento nel letto di char, che di fatto funge da filtro per il producer gas nella zona di riduzione. Di conseguenza, diventa necessario individuare una modalità di post-trattamento dei char per renderli conformi ai limiti normativi previsti per gli ammendanti, in quanto risulta particolarmente complesso poter efficacemente variare i parametri di processo dei gassificatori.

Come precedentemente evidenziato, anche la concentrazione di metalli quali cromo e zinco all'interno dei char rappresenta un fattore limitante per l'utilizzo di questo materiale come ammendante. In questo caso, le parti metalliche che movimentano i materiali solidi all'interno dei gassificatori, nonché quelle delle macchine utilizzate nei pretrattamenti (e.g. cippatrici e pellettatrici), potrebbero essere le principali responsabili di questa contaminazione. Infatti, come risulta dai dati riportati in Tabella 10, la biomassa cippata utilizzata in ingresso ad alcuni gassificatori, presenta già discrete concentrazioni di metalli (fra cui si evidenzia il contenuto di cromo).

Potrebbe risultare quindi di particolare interesse condurre uno studio sull'incidenza delle prime e delle seconde negli effetti di contaminazione da metalli dei char e valutare possibili sostituzioni o miglioramenti in fase di progettazione dei nuovi sistemi di gassificazione.

Tabella 10 – Concentrazioni di metalli nella biomassa pretrattata in ingresso ad alcuni gassificatori

	As	Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	Se	Zn
	[mg/kg]							
B	6,00	< 0,5	1,90	< 0,5	< 0,5	1,00	2,20	9,60
D	5,60	< 0,5	1,90	< 0,5	< 0,5	1,50	2,30	12,30
E	5,40	< 0,5	1,80	< 0,5	< 0,5	1,20	2,10	15,00
F	5,10	< 0,5	1,60	< 0,5	< 0,5	1,00	2,10	9,40
G	5,60	< 0,5	2,10	< 0,5	< 0,5	0,90	2,30	9,90
H	4,80	< 0,5	2,20	1,10	< 0,5	1,10	2,20	10,60

### 3.7 Biochar commerciali e altri standard europei di certificazione

Sia i char raccolti durante le attività di monitoraggio degli impianti attualmente operanti in Alto Adige, sia i char prodotti in condizioni controllate, sono stati confrontati con i limiti imposti da altri standard europei, nello specifico: IBI, EBC e BQM. Mentre biochar commerciali sono stati confrontati con i limiti normativi italiani.

In Tabella 11 sono riportate le caratteristiche dei biochar commerciali prodotti dall'UK Biochar Research Center (<https://www.biochar.ac.uk/>). Questi biochar sono stati confrontati con la normativa italiana riguardo agli ammendanti attualmente vigente. Come si può notare dai dati riportati in tabella, ed in particolare dai valori evidenziati in rosso, anche i biochar prodotti e commercializzati dall'UK Biochar Research Center non soddisfano totalmente i parametri imposti dalla normativa italiana, soprattutto per quel che concerne il contenuto di alcuni dei metalli pesanti. Si può osservare, infatti, come il valore più significativo sia il contenuto di cadmio, eccedente i limiti normativi in quasi tutti i casi. Peraltro, risulta importante notare come i fattori di emissione relativi alla sommatoria dei 16 idrocarburi policiclici aromatici rientrino pienamente all'interno dei suddetti limiti. Questo dato risulta essere di particolare interesse, in quanto pressoché tutti i char prodotti dagli impianti operanti in Alto Adige presentano concentrazioni di IPA molto maggiori rispetto ai limiti, come già ampiamente discusso in precedenza. In Tabella 11 sono stati utilizzati i seguenti acronimi per identificare biochar prodotti a partire da differenti materiali (pellet di miscanto, pellet di colza, lolla di riso, pellet di conifera, pellet di paglia di grano, liquami) e a due diverse temperature (i.e. 550 °C e 700 °C): MSP – Miscanthus Straw Pellets; OSR – Oil Seed Rape Straw Pellets; RH – Rice Husk; SWP – Soft Wood Pellets; WSP – Wheat Straw Pellets; SS – Sewage Sludge.

Tabella 11 – Confronto tra i parametri dei biochar commerciali e i limiti normativi italiani

C	H/C	Cenere	Umidità	Cr (tot)	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Σ IPA	TEQ <sub>PCB</sub>	TEQ <sub>DX</sub>
[%]	[mol/mol]	[%]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[ng/kg]	[mg/kg]
Limiti	> 20 < 0,7	< 60	≥ 20	0,5	100	230	500	1,5	140	6	0,5	9
MSP550	75,4	0,4	12,2	1,8	8,7	5,0	26,6	63,4	0,7	0,5	0,0	2,7
MSP700	79,2	0,2	11,6	2,2	36,1	30,4	5,9	44,5	4,6	0,1	0,0	3,9
OSR550	68,9	0,3	19,5	2,6	2,5	7,9	7,2	1,8	17,6	0,5	0,0	6,8
OSR700	67,7	0,2	21,9	3,6	4,4	3,3	13,8	8,8	3,0	< 0,11	0,0	4,5
RH550	48,7	0,3	47,9	1,5	5,0	3,0	5,4	23,6	17,8	0,2	0,0	5,1
RH700	47,3	0,2	47,9	1,5	2,7	26,9	36,2	20,0	0,3	0,3	0,0	5,9
SWP550	85,5	0,4	1,3	1,5	34,6	3,3	19,4	25,7	3,5	4,4	0,2	0,0
SWP700	90,2	0,2	1,9	1,0	123,4	74,1	9,7	99,6	8,2	0,2	0,2	3,3
WSP550	68,3	0,4	21,3	1,9	1,0	3,6	10,5	3,2	0,4	0,4	0,0	4,3
WSP700	69,0	0,2	23,8	2,2	4,5	2,5	4,7	12,0	1,3	< 0,11	0,0	1,8
SS550	29,5	0,5	58,9	2,5	275,7	57,2	255,2	835,7	11,7	201,2	0,1	3,1
SS700	29,6	0,3	63,9	1,7	292,7	66,3	296,6	896,2	12,4	195,9	0,1	0,4

Nelle tabelle riportate qui di seguito (tabelle 12–14) sono state confrontate le caratteristiche qualitative dei char prodotti dagli impianti altoatesini con i limiti imposti dai principali standard internazionali: IBI, EBC e BQM.

Come si può notare, anche nel caso in cui i char vengano confrontati con differenti standard i valori relativi ai metalli pesanti (soprattutto lo zinco) e agli idrocarburi policiclici aromatici risultano essere discriminanti. Come precedentemente ipotizzato, la contaminazione da zinco può essere generata dalle parti metalliche delle automazioni degli impianti così come da quelle dei macchinari che vengono utilizzati nei pretrattamenti di cippatura o di pellettizzazione della biomassa di partenza. Per quanto riguarda invece gli IPA, questi sembrano essere fortemente influenzati dal processo di gassificazione stesso e quindi devono essere eliminati attraverso efficaci post-trattamenti.

È inoltre interessante osservare la variabilità dei limiti imposti dai diversi standard considerati, che, a volte (per esempio nel caso dello standard IBI) sono anche piuttosto alti. Tanto che, per quanto riguarda il confronto dei valori dei char considerati con lo standard IBI, l'unico parametro che non risulta conforme riguarda gli idrocarburi policiclici aromatici. Tutti gli altri valori, compresi quelli relativi al contenuto di metalli pesanti, rientrano nei limiti imposti dallo standard.

Tabella 12 – Confronto tra i parametri dei char prodotti dagli impianti di gassificazione e i limiti dello standard IBI (in blu i valori eccedenti i limiti)

C	H/C	Ceneri	Umidità	Cr (tot)	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Σ IPA	TEQ <sub>PCB</sub>	TEQ <sub>Dx</sub>
[%]	[mol/mol]	[%]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[ng/kg]	[mg/kg]
≥10	<0,7	--	--	64-1200	47-600	63-1500	200-7000	1,4-39	70-500	6-20	0,2-0,5	9
A	68,6	0,0	27,8	6,6	6,6	34,4	478,1	1,5	0,4	5179,9	<1	<0,1
B	80,2	0,1	16,1	1,0	127,8	248,7	84,6	246,8	2,4	0,9	132,0	<1
C	48,0	0,2	49,5	14,3	16,5	73,3	1316,9	0,1	0,2	2,8	<1	<0,1
D	67,0	0,0	31,5	81,7	3,9	26,5	182,6	1,7	0,4	316,2	<1	<0,1
E	79,0	0,1	13,3	2,6	383,3	274,2	24,8	263,1	1,8	0,4	1225,2	<1
F	91,6	0,0	6,5	1,6	2,7	4,2	8,0	84,0	0,5	0,7	123,8	<1
G	69,5	0,0	29,2	0,2	16,7	40,6	46,9	397,4	0,4	0,4	31,7	<1
H	69,5	0,0	25,6	2,0	28,7	61,9	34,6	346,6	0,1	0,3	916,2	<1
I	55,2	0,1	29,5	5,3	8,0	51,4	586,2	6,1		60,2		<0,1
M	48,1	0,0	32,5	25,8	16,0	36,3	418,9	0,3		124,3		<0,1
R100	62,1	0,1	17,9	3,0	3,8	2,6	9,4	29,0	0,0	132,6		
R75	41,4	0,0	28,0	3,7	4,0	6,4	21,9	95,2	0,1	193,3		
R50	48,5	0,0	29,7	6,6	10,0	35,2	42,6	205,2	0,4	414,8		
O-R	71,1	0,0	11,2	1,4	6,2	4,0	11,7	14,8	0,1	34,2		
O-C	23,9	0,1	54,2	1,7	46,7	45,2	41,2	288,9	0,5	409,4		7,0
Q	84,9	0,2	3,9	3,0	1,7	2,4	8,0	48,5	0,0	27,0		

Tabella 13 – Confronto tra i parametri dei char prodotti dagli impianti di gassificazione e i limiti dello standard EBC (in verde i valori eccedenti i limiti)

C	H/C	Ceneri	Umidità	Cr (tot)	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Σ IPA	TEQ <sub>PCB</sub>	TEQ <sub>DX</sub>	
[%]	[mol/mol]	[%]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[ng/kg]	[mg/kg]	
EBC	> 50	< 0,7	--	--	80	30	100	400	1	120	4	0,2	20
A	68,6	0,0	27,8	6,6	6,6	34,4	478,1	1,5	0,4	5179,9	<1	<0,1	
B	80,2	0,1	16,1	1,0	127,8	248,7	84,6	246,8	2,4	0,9	132,0	<1	<0,1
C	48,0	0,2	49,5	14,3	16,5	73,3	1316,9	0,1	0,2	2,8	<1	<0,1	
D	67,0	0,0	31,5	81,7	3,9	5,3	26,5	182,6	1,7	0,4	316,2	<1	<0,1
E	79,0	0,1	13,3	2,6	383,3	274,2	24,8	263,1	1,8	0,4	1225,2	<1	<0,1
F	91,6	0,0	6,5	1,6	2,7	4,2	8,0	84,0	0,5	0,7	123,8	<1	<0,1
G	69,5	0,0	29,2	0,2	16,7	40,6	46,9	397,4	0,4	0,4	31,7	<1	<0,1
H	69,5	0,0	25,6	2,0	28,7	61,9	34,6	346,6	0,1	0,3	916,2	<1	<0,1
I	55,2	0,1	29,5	5,3	8,0	51,4	586,2	6,1	0,1	60,2	<1	<0,1	
M	48,1	0,0	32,5	25,8	16,0	36,3	418,9	0,3	0,3	124,3	<1	<0,1	
R100	62,1	0,1	17,9	3,0	3,8	2,6	9,4	29,0	0,0	132,6			
R75	41,4	0,0	28,0	3,7	4,0	6,4	21,9	95,2	0,1	193,3			
R50	48,5	0,0	29,7	6,6	10,0	35,2	42,6	205,2	0,4	414,8			
O-R	71,1	0,0	11,2	1,4	6,2	4,0	11,7	14,8	0,1	34,2			
O-C	23,9	0,1	54,2	1,7	46,7	45,2	41,2	288,9	0,5	409,4		7,0	
Q	84,9	0,2	3,9	3,0	1,7	2,4	8,0	48,5	0,0	27,0			

Stato dell'arte della gassificazione di biomasse legnose in Alto Adige

Tabella 14 – Confronto tra i parametri dei char prodotti dagli impianti di gassificazione e i limiti dello standard BQM (in arancione i valori eccedenti i limiti)

	C	H/C	Ceneri	Umidità	Cr (tot)	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Σ IPA	TEQ <sub>PCB</sub>	TEQ <sub>DX</sub>
	[%]	[mol/mol]	[%]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
BQM	15	10	10	150	3	60	20	0,5	20	0,5	20	<0,1	<0,1
A	68,6	0,0	27,8	6,6	6,6	34,4	478,1	1,5	0,4	5179,9	<1	<0,1	<0,1
B	80,2	0,1	16,1	1,0	127,8	248,7	84,6	246,8	2,4	0,9	132,0	<1	<0,1
C	48,0	0,2	49,5	14,3	16,5	73,3	1316,9	0,1	0,2	2,8	<1	<0,1	<0,1
D	67,0	0,0	31,5	81,7	3,9	5,3	26,5	182,6	1,7	0,4	316,2	<1	<0,1
E	79,0	0,1	13,3	2,6	383,3	274,2	24,8	263,1	1,8	0,4	1225,2	<1	<0,1
F	91,6	0,0	6,5	1,6	2,7	4,2	8,0	84,0	0,5	0,7	123,8	<1	<0,1
G	69,5	0,0	29,2	0,2	16,7	40,6	46,9	397,4	0,4	0,4	31,7	<1	<0,1
H	69,5	0,0	25,6	2,0	28,7	61,9	34,6	346,6	0,1	0,3	916,2	<1	<0,1
I	55,2	0,1	29,5	5,3	8,0	51,4	586,2	6,1		60,2		<0,1	<0,1
M	48,1	0,0	32,5	25,8	16,0	36,3	418,9	0,3		124,3		<0,1	<0,1
R100	62,1	0,1	17,9	3,0	3,8	2,6	9,4	29,0	0,0		132,6		
R75	41,4	0,0	28,0	3,7	4,0	6,4	21,9	95,2	0,1		193,3		
R50	48,5	0,0	29,7	6,6	10,0	35,2	42,6	205,2	0,4		414,8		
O-R	71,1	0,0	11,2	1,4	6,2	4,0	11,7	14,8	0,1		34,2		
O-C	23,9	0,1	54,2	1,7	46,7	45,2	41,2	288,9	0,5		409,4		7,0
Q	84,9	0,2	3,9	3,0	1,7	2,4	8,0	48,5	0,0		27,0		

## 4. Analisi tecnico economica sui possibili interventi di ottimizzazione d'impianto in un'ottica poligenerativa

### 4.1 Descrizione del Tool di calcolo

Per valutare la sostenibilità economica di potenziali interventi di ottimizzazione degli impianti di gassificazione operanti sul territorio altoatesino, con il fine di renderli in grado di produrre oltre all'energia elettrica e al calore anche char di qualità compatibile con i biochar per uso agricolo, è stato sviluppato un Tool di calcolo per la realizzazione del business plan d'impianto. Il Tool è stato sviluppato in ambiente Microsoft Excel e concepito al fine di mettere a confronto le prestazioni tecnico-economiche dell'impianto nella "configurazione originale", ossia l'impianto così come viene proposto sul mercato e sta operando sul territorio, con quelle nella "configurazione ottimizzata", ossia l'impianto modificato al fine di produrre char con una qualità migliore rispetto a quella ottenuta con l'impianto nella versione originale e tale da poter essere utilizzato in agricoltura.

Con riferimento alla misura di ottimizzazione individuata ed al relativo investimento, il Tool è stato costruito con la logica di determinarne gli effetti sulle prestazioni di impianto in termini di variazione nella produzione di energia elettrica, variazione nella produzione di energia termica, variazione nella produzione di char, variazione nei costi/ricavi legati alla valorizzazione del char prodotto, al fine di eseguire l'analisi dei flussi di cassa.

A seguito dell'inserimento da parte dell'utente dei parametri di impianto nella configurazione originale e in quella ottimizzata, il Tool restituisce l'andamento nel tempo del flusso di cassa netto e del flusso di cassa cumulato dell'impianto. Ciò con l'intento di evidenziare graficamente l'effetto nel tempo della misura di ottimizzazione d'impianto individuata sul conto economico dello stesso.

### 4.2 Campo di applicazione

Il Tool è stato sviluppato per essere applicato ad impianti di gassificazione del legno di potenza elettrica nominale compresa fra 1 e 999 kW, che utilizzano biomassa inquadrate come sottoprodotto e che sono entrati in esercizio fra il

2012 e il 2018, fruendo dell'incentivazione statale prevista da uno dei seguenti decreti:

- Decreto Ministeriale 18 dicembre 2008 (tariffa omnicomprensiva);
- Decreto Ministeriale 6 luglio 2012 (Decreto FER 2012);
- Decreto Ministeriale 16 giugno 2016 (Decreto FER 2016).

Avendo riscontrato, attraverso le indagini svolte in corso di progetto, che in Alto Adige non vi sono impianti messi in funzione al di fuori di tali sistemi incentivanti, non si è ritenuto necessario includere altri meccanismi di incentivazione alternativi e non cumulabili con quelli elencati, quali lo Scambio Sul Posto o il Ritiro Dedicato. Le tariffe considerate sono automaticamente selezionate indicando il periodo di avvio ufficiale dell'impianto, considerando anche le decurtazioni annue, laddove previste dalla normativa.

### 4.3 Analisi economica dei possibili interventi di ottimizzazione

La difficoltà nel correlare le caratteristiche tecniche di funzionamento degli impianti alla qualità del char prodotto, ha impedito di identificare, su base scientifica, soluzioni tecniche e possibili interventi di ottimizzazione d'impianto finalizzati a migliorare la qualità del char prodotto. Nel corso del progetto si è rivelata impraticabile anche la possibilità di sperimentare soluzioni di ottimizzazione di carattere empirico, e ciò per diversi motivi:

- impossibilità di variare i parametri di funzionamento degli impianti a seguito dei rischi connessi con la diminuzione dei profitti conseguente all'uscita dal regime incentivante e con i possibili danni e malfunzionamenti di impianto derivanti;
- peculiarità dell'iter autorizzativo che prevede la valutazione dell'idoneità all'esercizio (da parte dell'Ufficio Aria e Rumore) sulla base di un progetto ben definito e a cui non possono essere apportate modifiche "importanti/sostanziali" nel corso della vita tecnica, pena la decadenza dell'autorizzazione stessa. Da ciò ne è conseguita l'automatica impossibilità di effettuare interventi di ottimizzazione rilevanti quali ad esempio la sostituzione della tipologia del reattore o l'aggiunta di una nuova parte di impianto come ad esempio l'applicazione di un "reformer";
- mancata disponibilità da parte dei gestori di impianto di implementare modifiche d'impianto di carattere empirico e quindi dall'esito poco certo;

- indisponibilità da parte dei partner di ricerca di un impianto di laboratorio di dimensioni paragonabili a quelli di mercato su cui sperimentare liberamente soluzioni e strategie per migliorare la qualità del char prodotto. Ciò premesso si è convenuto di eseguire l'analisi economica di una possibile modifica d'impianto in grado di trasformare il char prodotto da "costo" (a causa della sua scarsa qualità e della conseguente necessità di essere smaltito come rifiuto) a "risorsa" (ossia venduto sul mercato) con un "approccio a ritroso". L'analisi economica a ritroso è stata effettuata nel seguente modo: fissati tre possibili prezzi di vendita del char in funzione delle attuali quotazioni di mercato dello stesso in campo agricolo, è stato calcolato l'ammontare massimo disponibile (ottenuto dalla vendita del char) per eseguire le modifiche d'impianto, considerando come tempo per ammortizzare l'investimento la vita residua dell'impianto.

#### 4.4 Definizione della configurazione originale

L'analisi economica dell'impianto nelle due configurazioni, quella originale (ossia di mercato) e quella ottimizzata (ossia modificata per ottenere un char di qualità) è stata eseguita non con riferimento ai dati ed alle caratteristiche di una specifica tecnologia o impianto di gassificazione, ma ad un impianto ideale caratterizzato da dati tecnici e prestazioni corrispondenti ai valori medi degli impianti censiti in Alto Adige. Nella definizione dei singoli parametri d'impianto nella "configurazione originale" si è tenuto conto delle considerazioni di seguito riportate.

- Dall'analisi dell'evoluzione degli impianti di gassificazione in Alto Adige è emerso come, complice il sistema di incentivazione al tempo molto favorevole, la gassificazione del legno ha visto fra il 2012 e il 2015 la realizzazione di 35 impianti su un totale oggi attivo di 44. Per tale motivo si è scelto di fare l'analisi su un ipotetico impianto entrato in funzione nel 2013.
- Anche la scelta della potenza dell'impianto in oggetto è stata fatta tenendo conto delle caratteristiche degli impianti oggi in funzione. Nello specifico si è quindi optato per un impianto composto da due moduli aventi potenza nominale di 45 kW elettrici e di 100 kW termici (la maggioranza degli impianti presenta tali caratteristiche).

- I restanti parametri tecnico/economici utilizzati per la configurazione originale sono stati scelti partendo dalle medie ottenute dai dati raccolti dal censimento degli impianti ed effettuando una valutazione comparativa con i valori riferiti a singoli impianti aventi potenza elettrica analoga a quella di progetto.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** si riportano quindi i valori dei parametri scelti per caratterizzare la “configurazione originale” d’impianto.

#### 4.5 Definizione della “configurazione ottimizzata”

L’analisi è stata eseguita considerando un prezzo di vendita del char compreso tra 0 €/ton e 500 €/ton. I parametri e le ipotesi di funzionamento, come anche le giustificazioni che hanno portato alla loro assunzione, sono riportati di seguito.

- “Anno dell’investimento”: la scelta dell’anno in cui eseguire l’intervento è stata fatta tenendo conto di due fattori:
  - la maggior parte degli impianti presenti nel territorio locale è stata autorizzata tra il 2013 e il 2015 (27 impianti su 44 oggi in funzione) e può quindi godere dell’incentivazione prevista ancora per circa 13 - 15 anni;
  - si suppone che serva ancora qualche anno di ricerca per l’identificazione e lo sviluppo di potenziali modifiche d’impianto propeedeutiche a migliorare la qualità del char;
- È stato ipotizzato di attuare la modifica di impianto nel 10° anno di esercizio (considerando che in tale anno si abbia già il vantaggio derivante dall’ottimizzazione di impianto) e considerando quindi un periodo di ritorno dell’investimento legato all’ottimizzazione di impianto di ulteriori 11 anni (stimando una vita utile di impianto di circa 20 anni, pari al periodo di incentivazione).
- La produzione di energia elettrica, termica e di char è stata assunta uguale a quella dell’impianto nella configurazione originale.

Tabella 15 – Parametri relativi alla "configurazione originale" d'impianto riferiti ad un impianto ideale caratterizzato da parametri di funzionamento rappresentativi

Elemento	Valore	Elemento	Valore
Nome della tecnologia	"Impianto Teorico"	Costo specifico impianto [€/kW]	6 500
N° moduli	2	Personale [€/kWh]	0,03
Periodo di avvio	Dal 01/2013 al 12/2013	Assicurazione [€/a]	2 500
Potenza elettrica modulo [kW]	45	Pratiche GSE [€/a]	1 200
Potenza termica del modulo [kW]	100	Manutenzione [€/kWh]	0,03
Ore annue di funzionamento [ore]	7 500	Prezzo di acquisto della biomassa [€/ton]	94
Autoconsumo elettrico [%]	11	Prezzo di vendita del calore [€/MWh]	40
Consumo biomassa annuo [kg/kWh]	1,1	Costo smaltimento char [€/ton]	155
Produzione specifica char [kg/kWh]	0,02	Energia termica utilizzata per essiccazione [%]	50
Capitale proprio [%]	0	Energia termica valorizzata [%]	30
Interesse finanziamento [%]	3,5	Tariffa incentivante [€/MWh]	251,86
Durata mutuo [anni]	10	Durata incentivazione [anni]	20

- Sulla base del prezzo di mercato del char in campo agricolo sono state ipotizzate quattro differenti configurazioni ottimizzate d'impianto, ciascuna caratterizzata da un prezzo target di vendita del char sul mercato:

- Conf. ottimizzata 1 – Prezzo valorizzazione char pari a 0 €/ton;
  - Conf. ottimizzata 2 – Prezzo valorizzazione char pari a 100 €/ton;
  - Conf. ottimizzata 3 – Prezzo valorizzazione char pari a 200 €/ton;
  - Conf. ottimizzata 4 – Prezzo valorizzazione char pari a 500 €/ton.
- Nella configurazione ottimizzata 1 si è ipotizzato che il char non fosse di qualità tale da essere utilizzabile in agricoltura, ma che potesse essere smaltito dall'impianto a costo nullo e non negativo (ad esempio come sottoprodotto riutilizzabile nell'industria delle costruzioni). Nell'ipotesi 4 si è delineato invece il caso migliore, legato cioè ad una produzione di char di qualità tale da permetterne la vendita ad un prezzo di 500 €/ton.

Avendo eseguito l'analisi economica a ritroso, il Tool è stato fatto funzionare inserendo il costo di investimento legato all'intervento di ottimizzazione d'impianto pari a zero. L'ammontare massimo disponibile per attuare le modifiche d'impianto in ciascuna configurazione ottimizzata (dalla n° 1 alla n° 4) è stato dunque ricavato come differenza tra il capitale cumulato dopo i 20 anni di esercizio nella configurazione ottimizzata e quella originale.

#### 4.6 Risultati dell'analisi economica

Con riferimento a ciascuna configurazione ottimizzata, i risultati della simulazione economica, in termini di capitale cumulato a valle dei 20 anni di esercizio e di capitale disponibile per la realizzazione di un intervento di ottimizzazione dell'impianto (da implementare, come da ipotesi, al decimo anno di esercizio), sono riportati in Tabella 16 e nelle Figure 4 e 5. Si osserva che, supponendo di attuare la modifica di impianto a partire dal decimo anno di esercizio e ipotizzando un ritorno dell'investimento nei restanti 11 anni di attività dell'impianto, il budget massimo disponibile per l'eventuale ottimizzazione d'impianto varia da un minimo di 23 mila euro ad un massimo di 97 mila euro. Ad oggi, vista l'impossibilità di definire gli interventi di ottimizzazione attuabili, risulta difficile capire se tali importi risultino adeguati e/o sufficienti a consentire la vendita del char ai prezzi ipotizzati. Tuttavia, il valore degli importi in oggetto può fornire un'utile indicazione in merito ai requisiti economici di una eventuale soluzione tecnologica che potrà essere individuata anche in futuro (sia dal mondo della ricerca che dal mondo degli operatori industriali), perché possa essere appetibile per il mercato.

Tabella 16 – Simulazione dell'andamento del capitale cumulato dopo 20 anni, delle differenze tra capitale cumulato annuo post e pre intervento ( $\Delta$  post/pre ottimizz.) e del capitale massimo disponibile per l'ottimizzazione di impianto per ogni configurazione ottimizzata.

Config.	Costo smaltimento	Prezzo di vendita	Capitale cumulato (20 anni)	$\Delta$ post/pre ottimizz.	Capitale max. disponibile
	[€/t]	[€/t]	[€]	[€]	[€]
Originale	155	0	291 929	-	0
Ottimizz. 1	0	0	314 947	2 093	23 018
Ottimizz. 2	0	100	329 797	3 443	37 868
Ottimizz. 3	0	250	352 072	5 468	60 143
Ottimizz. 4	0	500	389 197	8 843	97 268

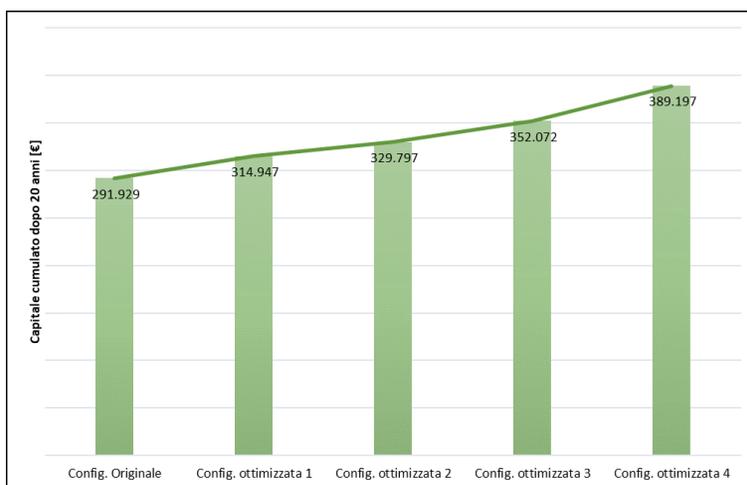


Fig. 4 – Capitale cumulato dopo 20 anni di esercizio nella configurazione originale e nelle quattro ottimizzate

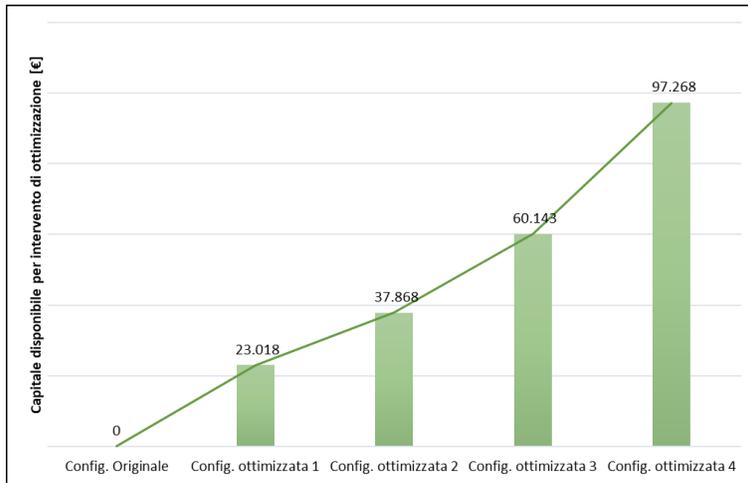


Fig. 5 – Capitale disponibile per l'intervento di ottimizzazione nelle quattro configurazioni individuate

Per una maggiore comprensione del risultato ottenuto e con riferimento ad ogni configurazione ottimizzata, in Figura 6 sono stati riportati gli introiti annui d'impianto legati a:

- incentivazione e vendita dell'energia elettrica prodotta;
- vendita dell'energia termica;
- mancato costo di smaltimento e/o vendita del char (voce identificata nel grafico come "Energia legata conf. Ott.").

Nello specifico si osserva che le maggiori entrate annue legate all'ottimizzazione dell'impianto e derivanti dalla vendita di un char di qualità risultano percentualmente piuttosto limitate e comprese tra l'1% e il 5% delle entrate totali, rimanendo predominante il contributo derivante dall'incentivazione dell'energia elettrica e termica prodotta.

Tuttavia, per prezzi di vendita del char pari a 500 €/ton, come ipotizzato nella configurazione ottimizzata n°4, o superiori, ipotizzabili nel caso di un'evoluzione positiva del mercato del char (ad esempio nell'ipotesi che ad esso possano essere riconosciute importanti proprietà per il miglioramento della qualità dei suoli e/o la capacità di stoccare carbonio), l'intervento di ottimizza-

zione di un impianto esistente trova giustificazione sia dal punto di vista ambientale che economico. Tale affermazione risulta tanto più vera quanto più l'intervento viene fatto a ridosso dei primi anni di esercizio dell'impianto.

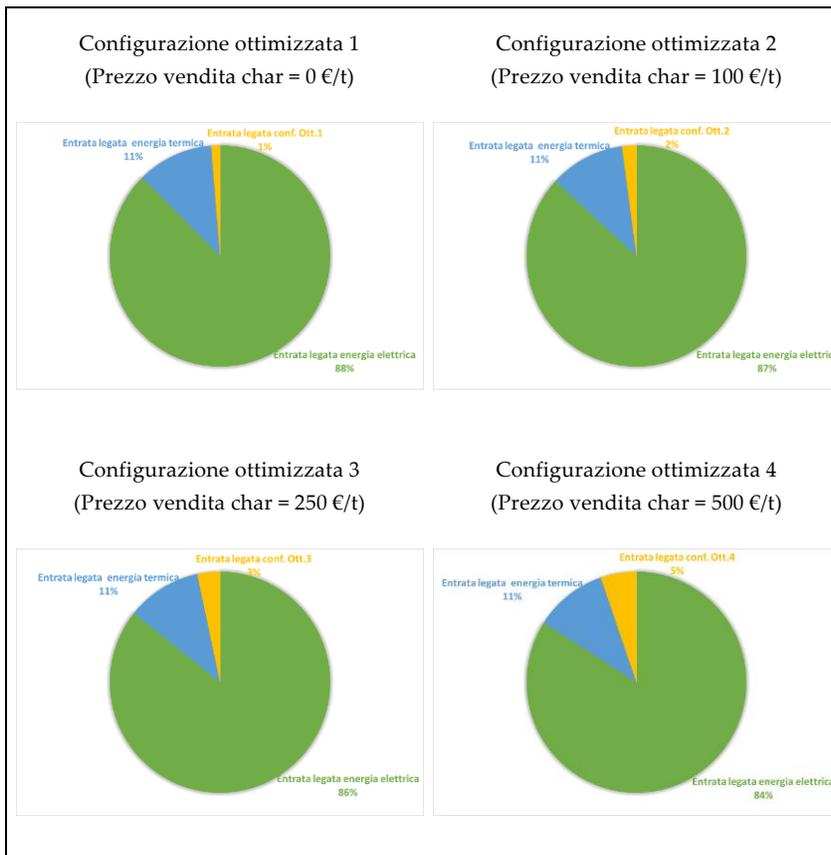


Fig. 6 – Suddivisione percentuale delle singole voci relative alle entrate annue di impianto nelle quattro distinte configurazioni ottimizzate

## 5. Conclusioni

Le informazioni raccolte in merito ai flussi delle biomasse e dei residui rispettivamente in ingresso e in uscita dagli impianti di gassificazione in funzione in Alto Adige, hanno permesso di costruire un quadro generale e rappresentativo del funzionamento e della gestione di questi impianti. Dallo studio condotto è emerso che annualmente vengono prodotte circa 1 300 tonnellate di char, attualmente smaltite come rifiuto speciale non pericoloso. La possibilità di utilizzare il char prodotto dai gassificatori installati in Alto Adige come ammendante (i.e. assimilabile a biochar), ai sensi del D.Lgs. 75/2010 e s.m.i., è soprattutto vincolata al contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e alla presenza di alcuni metalli pesanti, i cui valori eccedono, a volte anche di molto, i limiti normativi. Comparando i risultati delle analisi chimico-fisiche condotte sui char con i principali standard europei (IBI, EBC e BQM) è emerso come la presenza degli IPA continui ad essere il fattore limitante per un suo utilizzo in agricoltura. Nell'ottica di rendere gli attuali impianti di gassificazione dei sistemi poligenerativi, in grado quindi di produrre un biochar utilizzabile come ammendante oltre all'energia termica ed elettrica, risulta necessario intervenire sui principali parametri di processo (e.g. i profili di temperature all'interno del reattore) oppure di adottare sistemi di post-trattamento del char che consentano la riduzione degli IPA. Inoltre, la presenza di metalli pesanti all'interno dei char, altro fattore critico, potrebbe inoltre essere dovuta sia alle parti meccaniche utilizzate nella movimentazione dei materiali solidi negli impianti, sia ai pre-trattamenti di cippatura e pellettizzazione della biomassa legnosa.

La mancata individuazione di soluzioni e/o interventi specifici da implementare sugli impianti per ottenere un char di qualità, così come l'impossibilità di sperimentare l'efficacia di eventuali soluzioni empiriche sugli impianti esistenti, ha impedito di definire un set completo di dati tecnico-economici caratterizzanti la configurazione ottimizzata da utilizzare nelle simulazioni. L'analisi dell'effetto sull'economicità d'impianto di un intervento di ottimizzazione finalizzato ad ottenere un char di qualità compatibile con l'uso agricolo è stata quindi eseguita forzando l'uso del simulatore ed eseguendo un'analisi economica "a ritroso". Tale analisi è stata svolta su un "impianto ideale" caratterizzato da parametri medi di funzionamento e di esercizio ricavati dagli impianti censiti in Alto

Adige nel corso del progetto. Sulla base degli introiti generati dalla vendita del char e del mancato costo di smaltimento dello stesso a partire dall'anno in cui si è effettuato l'intervento di ottimizzazione fino alla fine della vita utile dell'impianto, si è stimato il capitale massimo potenzialmente a disposizione per effettuare l'intervento in oggetto. L'analisi economica ha messo in evidenza che il budget massimo disponibile per effettuare l'investimento di ottimizzazione d'impianto è risultato compreso tra un minimo di 23 mila euro a un massimo di 97 mila euro in funzione del prezzo di vendita al mercato del char a valle delle modifiche. Sebbene risulti difficile definire la congruità o meno degli importi in oggetto rispetto all'entità dell'investimento da affrontare per adeguare l'impianto alla produzione di char (al prezzo di vendita ipotizzato), essi possono tuttavia costituire un'indicazione di massima sui requisiti di economicità che una soluzione tecnologica di ottimizzazione dovrebbe avere per essere appetibile sul mercato.

## Bibliografia

- Benedetti, V., Ail, S. S., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2019). Valorization of Char From Biomass Gasification as Catalyst Support in Dry Reforming of Methane. *Frontiers in Chemistry*, 7(March), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00119>
- Benedetti, V., Ail, S. S., Patuzzi, F., Cristofori, D., Rauch, R., & Baratieri, M. (2020). Investigating the feasibility of valorizing residual char from biomass gasification as catalyst support in Fischer-Tropsch synthesis. *Renewable Energy*, 147, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.050>
- Benedetti, V., Cordioli, E., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2019). CO<sub>2</sub> Adsorption study on pure and chemically activated chars derived from commercial biomass gasifiers. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 33(April), 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.008>
- Benedetti, V., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2018). Characterization of char from biomass gasification and its similarities with activated carbon in adsorption applications. *Applied Energy*, 227, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.076>

- Cordioli, Patuzzi, & Baratieri. (2019). Thermal and Catalytic Cracking of Toluene Using Char from Commercial Gasification Systems. *Energies*, 12(19), 3764. <https://doi.org/10.3390/en12193764>
- European Biochar Foundation (2020, 1 giugno). *European Biochar Certificate*.
- Galhetas, M., Lopes, H., Freire, M., Abelha, P., Pinto, F., & Gulyurtlu, I. (2012). Characterization, leachability and valorization through combustion of residual chars from gasification of coals with pine. *Waste Management*, 32(4), 769–779. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.021>
- Hansen, V., Müller-Stöver, D., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Henriksen, U. B., & Hauggaard-Nielsen, H. (2015). Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment. *Biomass and Bioenergy*, 72(1), 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.013>
- Klinghoffer, N. B., Castaldi, M. J., & Nzihou, A. (2012). Catalyst properties and catalytic performance of char from biomass gasification. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(40), 13113–13122. <https://doi.org/10.1021/ie3014082>
- Marchelli, F., Cordioli, E., Patuzzi, F., Sisani, E., Barelli, L., Baratieri, M., ... Bosio, B. (2019). Experimental study on H<sub>2</sub>S adsorption on gasification char under different operative conditions. *Biomass and Bioenergy*, 126(April), 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.003>
- Patuzzi, F., Prando, D., Vakalis, S., Rizzo, A. M., Chiaramonti, D., Tirler, W., ... Baratieri, M. (2016). Small-scale biomass gasification CHP systems: Comparative performance assessment and monitoring experiences in South Tyrol (Italy). *Energy*, 112, 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.077>
- Piazzini, S., Zhang, X., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2020). Techno-economic assessment of turning gasification-based waste char into energy: A case study in South-Tyrol. *Waste Management*, 105, 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.038>
- Runtti, H., Tuomikoski, S., Kangas, T., Lassi, U., Kuokkanen, T., & Rämö, J. (2014). Chemically activated carbon residue from biomass gasification as a sorbent for iron(II), copper(II) and nickel(II) ions. *Journal of Water Process Engineering*, 4(C), 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.08.009>

